

Wolfgang Scobel Gunnar Lindström
Rudolf Langkau

Physik kompakt 1

Mechanik,
Fluiddynamik und Wärmelehre

Zweite Auflage
Mit 248 Abbildungen



Springer

Professor Dr. Wolfgang Scobel
Professor Dr. Dr. h.c. Gunnar Lindström
Professor Dr. Rudolf Langkau
Universität Hamburg
Institut für Experimentalphysik
Luruper Chaussee 149
22761 Hamburg, Deutschland
e-mail: wolfgang.scobel@desy.de
gunnar.lindstroem@desy.de

Die erste Auflage erschien in zwei Teilbänden in dem 6teiligen Werk *Physik kompakt* in der Reihe: Vieweg Studium – Grundkurs Physik, herausgegeben von Hanns Ruder, bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme:
Physik kompakt. –
Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Tokio : Springer
(Springer-Lehrbuch)
Bd. 1. Mechanik, Fluidodynamik und Wärmelehre / Wolfgang Scobel ... – 2. Aufl. – 2002
ISBN 3-540-43141-1

ISBN 3-540-43141-1 2. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ein Unternehmen der BertelsmannSpringer Science+Business Media GmbH

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Datenkonvertierung von Fa. LE-TeX, Leipzig
Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

SPIN: 10860363 56/3141/ba - 5 4 3 2 1 0

Inhaltsverzeichnis

Teil I Mechanik

1	Einleitung	3
1.1	Die Arbeitsmethode der Physik	3
1.2	Physikalische Größen, Maßsystem	3
1.3	Vektorielle Größen	8
1.4	Darstellung physikalischer Zusammenhänge	11
2	Kinematik des Massenpunktes	15
2.1	Massenpunkt und Bahnkurve	15
2.2	Geradlinige Bewegung; Geschwindigkeit und Beschleunigung .	15
2.3	Allgemeine krummlinige Bewegung	19
2.4	Kreisbewegung	22
2.5	GALILEI-Transformation	25
3	Dynamik des Massenpunktes	29
3.1	Die NEWTONSchen Axiome	29
3.2	Kraft und Masse	32
3.3	Anwendung der NEWTONSchen Bewegungsgleichung	36
3.4	Trägheitskräfte in beschleunigten Bezugssystemen	39
4	Erhaltungsgrößen der Mechanik	51
4.1	Kraft und Linearimpuls. Allgemeine Formulierung der NEWTONSchen Bewegungsgleichung	51
4.2	Drehmoment und Drehimpuls	54
4.3	Arbeit und Leistung	60
4.4	Kinetische und potentielle Energie	64
4.5	Energieerhaltung	70
5	Massenpunktsysteme	77
5.1	Die NEWTONSche Bewegungsgleichung	77
5.2	Erhaltungssätze	82
5.3	Wechselwirkungen mit kurzer Reichweite; Stoßgesetze	88

6	Starrer Körper	93
6.1	Starrer Körper als System von Massenpunkten	93
6.2	Statik des starren Körpers	97
6.3	Dynamik des starren Körpers; Rotation um feste Achse	102
6.3.1	Berechnung von Trägheitsmomenten	106
6.3.2	Beispiele für Drehbewegungen um eine feste Achse	109
6.3.3	Arbeit, Leistung und kinetische Energie bei Drehbewegungen um eine feste Achse	112
6.3.4	Drehimpulserhaltung bei raumfester Achse	113
6.4	Rotation um freie Achsen; Kreisel	114
7	Relativistische Mechanik	123
7.1	Relativitätsprinzip	123
7.2	LORENTZ-Transformation	124
7.3	Relativistische Dynamik	127
7.4	Ergänzung: Graphiken zur speziellen Relativitätstheorie	131
7.4.1	Voraussetzungen	131
7.4.2	Koordinaten-Transformation im nichtrelativistischen Fall (GALILEI-Transformation)	132
7.4.3	Koordinaten-Transformation im relativistischen Fall (LORENTZ-Transformation)	132
7.4.4	Masse und Impuls im relativistischen Fall	136
7.4.5	Kinetische Energie im relativistischen Fall	137
7.4.6	DE-BROGLIE-Wellenlänge im relativistischen Fall	140
8	Anhang: Differentialgleichungen zu Grunderscheinungen der Physik	147
8.1	Einleitung	147
8.2	Bewegungsgleichungen	148
8.2.1	Das 2. NEWTONSche Axiom	148
8.2.2	Die Kraft ist konstant	150
8.2.3	Die Kraft ist konstant und bremsend	152
8.2.4	Die Kraft ist konstant; die Masse wächst linear mit der Zeit	154
8.2.5	Die Kraft ist konstant; der Massenverlust ist proportional zur Geschwindigkeit	156
8.2.6	Die Kraft ist proportional zum Ort	158
8.2.7	Die Kraft ist proportional zum Ort, aber rücktreibend	162
8.2.8	Die Kraft ist harmonisch	167
8.2.9	Die Kraft ist proportional zur Geschwindigkeit und bremsend	170
8.2.10	Die Kraft ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit und bremsend	179
8.2.11	Die Kraft ist die Summe aus elastischer Bindungskraft und geschwindigkeitsproportionaler Bremskraft	186

8.2.12 Die Kraft ist die Summe aus elastischer Bindungskraft, Bremskraft und einer äusseren zeitabhängigen Kraft	192
8.2.13 Die Kraft ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes vom Koordinatenursprung	212
8.2.14 Gekoppelte Bewegungsgleichungen (Gekoppelte Schwingungen)	216

Teil II Fluiddynamik und Wärmelehre

1 Mechanische Schwingungen	225
1.1 Allgemeines	225
1.2 Harmonische Schwingungen	225
1.3 Gedämpfte harmonische Schwingungen	229
1.4 Mathematische Ergänzung: Allgemeine Behandlung der Differentialgleichung für gedämpfte Schwingungen	231
1.5 Erzwungene harmonische Schwingungen; Resonanz	233
1.6 Überlagerung harmonischer Schwingungen	237
1.7 Mathematische Ergänzung: FOURIER-Analyse	241
1.8 Gekoppelte harmonische Schwingungen	246
1.9 Molekülschwingungen als Beispiel anharmonischer Schwingungen	249
2 Harmonische Wellen in stabförmigen elastischen Medien	253
2.1 Grundlagen	253
2.2 Stehende harmonische Wellen	255
2.3 Eigenschwingungen stabförmiger Medien	257
2.4 Energietransport durch harmonische Wellen	259
3 Mechanik fester Körper	261
3.1 Verformung und mechanische Spannung	261
3.2 Grundtypen der elastischen Verformung	262
3.3 Abgeleitete elastische Verformungen	265
3.4 Überschreitung des Elastizitätsbereichs	268
4 Mechanik ruhender Flüssigkeiten und Gase	269
4.1 Druck in Flüssigkeiten und Gasen	269
4.2 Kompressibilität	270
4.3 Schweredruck	272
4.4 Ergänzung: Druck und Dichte in der Erdatmosphäre	278
4.5 Auftrieb und messtechnische Anwendungen	281
4.6 Oberflächen von Flüssigkeiten	285
4.7 Harmonische Druckwellen in Flüssigkeiten und Gasen	292
4.8 Ergänzung: Lösung der Wellengleichung	296

5	Mechanik strömender Flüssigkeiten und Gase	301
5.1	Einleitung	301
5.2	Stationäre Strömung idealer Fluide	301
5.3	Druckmessung in Strömungen	304
5.4	Anwendungen der BERNOULLIschen Gleichung	305
5.5	Stationäre Strömung realer Fluide	310
5.6	Turbulente Strömung realer Fluide	316
6	Wärmelehre	321
6.1	Vorbemerkungen und Begriffserläuterungen	321
6.1.1	Stoffmenge und Teilchenzahl	322
6.2	Temperatur und Thermometer	323
6.2.1	Nicht-absolute Temperaturskala (nach CELSIUS)	324
6.2.2	Absolute (thermodynamische) Temperaturskala	324
6.2.3	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper	325
6.2.4	Thermische Ausdehnung von Gasen	326
6.2.5	Das Gasthermometer	328
6.3	Zustandsgleichung idealer Gase	328
6.4	Grundzüge der kinetischen Gastheorie	329
6.4.1	Druck des Modellgases	329
6.4.2	Temperatur und kinetische Energie	331
6.4.3	Innere Energie idealer Gase	332
6.5	Wärme, eine Form der Energieübertragung	333
6.5.1	Wärmemenge und Wärmekapazität	335
6.5.2	Kalorimetrie	335
6.6	Barometrische Höhenformel und BOLTZMANN-Verteilung	339
6.6.1	MAXWELL-BOLTZMANNsche Geschwindigkeits- verteilung	341
6.7	Der I. Hauptsatz der Wärmelehre	342
6.7.1	Zustandsänderungen am idealen Gas	343
6.7.2	Reversible und irreversible Zustandsänderungen	348
6.7.3	Spezielle Kreisprozesse	349
6.7.4	Wärmepumpe und Kältemaschine	353
6.8	Der II. Hauptsatz der Wärmelehre	354
6.8.1	Die thermodynamische Temperaturskala	355
6.8.2	Die Entropie	356
6.8.3	Entropieänderungen am idealen Gas	357
6.8.4	Entropieänderung bei irreversiblen Prozessen	359
6.9	Aggregatzustände und Phasen	360
6.9.1	Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf	361
6.9.2	Koexistenz von Festkörpern und Flüssigkeit oder Gas	364
6.9.3	Zustandsgleichung realer Gase	365
6.9.4	Gasverflüssigung: JOULE-THOMSON-Effekt	368
6.10	Transportphänomene	369
6.10.1	Molekulardiffusion (= Massentransport)	370

6.10.2	Wärmeleitung (= Energietransport)	373
6.10.3	Viskosität (= Impulstransport)	375
6.11	Gaskinetische Betrachtung der Transportphänomene	377
6.11.1	Wirkungsquerschnitt, mittlere freie Weglänge	377
6.11.2	Gaskinetische Herleitung der Transportkoeffizienten D, λ, η	379
6.11.3	BROWnsche Bewegung	382
7	Anhang: Differentialgleichungen zu Grunderscheinungen der Physik	385
7.1	Die Wellengleichung	385
7.1.1	Aufstellung der Wellengleichung für den Fall von Schallwellen	385
7.1.2	Lösungen der Wellengleichung	387
7.1.3	Harmonische Wellen	393
7.1.4	Berücksichtigung von Reibungskräften und anderen Einflüssen	395
7.2	Die Transportgleichung	400
7.2.1	Physikalische Grunderscheinungen	400
7.2.2	Lösungen der Transportgleichung	405
7.2.3	Eine "Transportgleichung" ohne Transportlösung	430
	Sachwortverzeichnis	433